



摩擦型ダンパーの性能評価とそれを用いた橋梁の設計法に関する研究

著者	武田 篤史
号	59
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工第2232号
URL	http://hdl.handle.net/10097/62762

氏 名 武 田 篤 史
授 与 学 位 博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日 平成 27 年 3 月 4 日
学位授与の根拠法規 学位規則第 4 条第 2 項

学 位 論 文 題 目 摩擦型ダンパーの性能評価と
それを用いた橋梁の設計法に関する研究

論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 鈴木基行 東北大学教授 岩熊哲夫
東北大学教授 風間基樹 東北大学教授 京谷孝史

論 文 内 容 要 旨

本論文は、橋梁用に適しているダンパーとして、皿バネボルトセットを用いた摩擦型ダンパー（以下、ブレーキダンパーと称す）の利用に着目し、その性能を評価するとともに、設計法を提案したものである。

まず、背景として、建築分野ではすでに一般的となっている制震構造に関して、橋梁分野では適用が進んでいない状況を示し、その要因として、橋梁に適したダンパーが少ないことと、制震橋梁の設計法に関する整備が遅れていることを指摘した。そこで、橋梁に適しているダンパーとしてブレーキダンパーに着目し、その性能を評価するとともに、ブレーキダンパーを用いた設計法について整備することで、制震橋梁の拡大につながるものと考えた。

ブレーキダンパーは、摩擦材とステンレス板が摺動することにより、摩擦熱を発生して振動エネルギーが熱エネルギーに変換される仕組みのダンパーである。図に示すように摩擦面における垂直抗力は面圧ボルトを締付けることで発生させるが、皿バネを介することでその垂直抗力を安定化させている。摩擦材は自動車のブレーキに用いられるものを橋梁用に改造したものであり、フェノール樹脂を原料とする。必要により、摩擦面を多くすることでコンパクト化が可能となる。橋梁に用いる際は、皿バネボルトセットを複数組み合わせ、両端にクレビスを設ける。摩擦係数、面圧ボルト締付け力、摩擦面数および皿バネボルトセットの個数の積により減衰力が定まる。建築分野ではすでに数多く適用されているが、橋梁に適用する際に必要となるストロークや減衰力の大型化、高耐久性化が行いやすく、単純な機構により高い信頼性が得られるため、橋梁にも適していると考え、橋梁用に改造して本研究の対象とした。

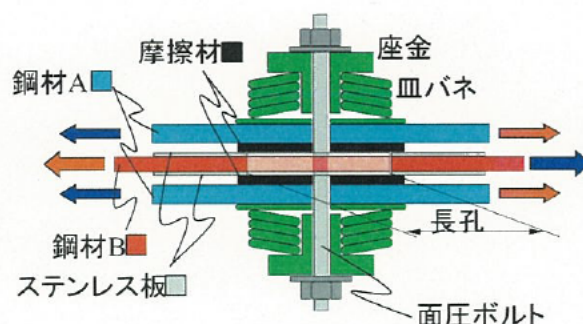


図 ブレーキダンパーの仕組み

ブレーキダンパーの性能評価は、実規模のダンパーに対する動的载荷により行った。载荷波形には、橋梁に用いられた場合の作用を想定した地震応答波などを用いた。

設計法の検討は、最初に、RC 橋脚や上部構造を含む橋梁系全体の実験を通して、地震応答性状の考察やダンパーのモデル化に関する検討を行った。次に、1 質点系の地震応答解析をパラメトリックに行うことによって、制震橋梁に組み込むべきダンパーの減衰力容量について検討を行った。

最後に、本研究全体を受けて、ブレーキダンパーを用いた制震橋梁の設計法をまとめた。

本論文は7章で構成される。以下に、各章ごとの概要をまとめる。

第1章では、研究の背景として、橋梁の地震対策の現状や制震構造の概要をまとめ、制震構造の適用が進んでいない状況を示した。次に本研究の対象とするブレーキダンパーに関して、概要を示し、橋梁へ適用することを前提としてその特長をまとめた。これらを受けて、課題として、(1)橋梁用のダンパーおよびその評価手法が発展途上であること、(2)制震橋梁の設計法が整備されていないことの2点を挙げ、本研究の目的が、これらの課題の解決であり、制震橋梁を実用に供することができるようにするものであることを示した。

第2章では、ダンパーの性能評価および設計法に関しての既往の研究をまとめた。その結果、(1)実構造物の設計に用いることができる程度に簡便で、かつ、ダンパーの効果を十分に評価できるモデル化、(2)実験による制震橋梁の動的挙動の検討、(3)設計におけるダンパー減衰力容量の選定方法、の3点が必要であることを示した。

第3章では、ブレーキダンパーの設計モデル構築を目的として、ダンパー単体を動的に強制変形させた実験を行い、その性能を確認した。実験は、基礎的な性状を確認するための正弦波入力と、地震時減衰性能を把握するための地震応答波入力により行った。実験の結果、ブレーキダンパーの減衰力－変位関係のループは良好な減衰性能を示し、完全弾塑性型のバイリニアモデルでモデル化できる形状であることが明らかとなった。さらに、ブレーキダンパーが有する速度依存性や繰り返し数依存性を考慮できる評価モデルおよび設計モデルを示した。ここで示した評価モデルは実験結果と良い対応が得られており、設計モデルは安全側の評価となることを確認した。なお、本章において行った地震時性能の評価手法は、各種依存性を有するさまざまなダンパーの評価に対して用いることが可能である。

第4章では、橋梁を制震構造としたときの挙動を明らかにすることを目的として、橋梁全体系の振動台実験を行なった。振動台実験は、写真に示すように、振動台上に橋脚模型（RC 造）、橋台模型（S 造）、桁模型を2セット配置し、1セットのみにブレーキダンパーを付加したものであり、慣性力に対しては橋脚模型およびブレーキダンパーのみが抵抗する機構としている。実験の結果得られた主な結論を以下に示す。

1) L1 地震動に対して、ダンパーを用いることで、応答変位を小さくすることが可能である。そのときのダンパーの効果は、主に全体系の剛性が上昇したことによるものである。

2) L2 地震動に対して、ダンパーを用いるこ

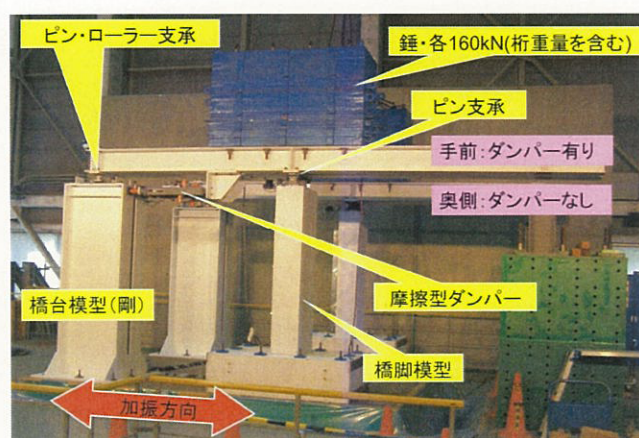


写真 橋梁全体系振動台実験

とで応答変位を小さくすることが可能である。そのときのダンパーの効果は、履歴減衰が中心である。ただし、応答変位の減少割合は L1 地震動に対する割合に比べて小さい。

3) 本実験において、ダンパーの降伏震度が橋脚降伏震度の 1/4 程度であっても、L2 地震動におけるエネルギー吸収はそのほとんどをダンパーが受持った。

4) 実験で並列に用いた 2 基のブレーキダンパーは、ほぼ同様の挙動をしており、ダンパーの個体差は小さい。

また、ダンパーのモデル化に関する影響を把握するとともに、第 3 章で構築した評価モデルおよび設計モデルの検証を目的として、ダンパーのモデル化をパラメーターとした上記振動台実験のシミュレーションを行なった。解析の結果得られた主な結論を以下に示す。

5) ダンパーをバイリニアモデルとすることにより、RC 橋脚模型とダンパーの履歴吸収エネルギーに関する性状を再現することは可能であり、変位時刻歴の位相についても良い精度で解析することが可能である。

6) ダンパーのモデル化に当たって、ダンパーの減衰力容量は速度を考慮し、注意して決定する必要がある。

7) ダンパーのモデル化に当たって、ダンパーの剛性は、原点と摺動開始点を結んだ降伏時割線剛性を用いると、ダンパーを過大に評価することとなる。クレビスの遊び等により生じるすべりを含む、振動特性に対して支配的な剛性を用いる必要がある。

8) 第 3 章に示した方法によりダンパーをモデル化すれば、十分安全側の評価が可能である。

第 5 章では、制震橋梁の実務設計において、ダンパーの減衰力容量をどのように選定するかという課題に対し、橋梁条件をパラメーターとして、1 質点系モデルの地震応答解析を行い検討した。検討においては、ダンパーの履歴吸収エネルギーと最大応答変位に着目した。検討の結果得られた主な結論を以下に示す。

1) ダンパー減衰力容量が大きくなるにつれて、最大応答変位は低減するが、ダンパーの履歴吸収エネルギーはある点で極値を取り、それ以上ダンパー減衰力容量を大きくしても履歴吸収エネルギーは低下する。

2) 制震橋梁は、非制震の橋梁に比較し入力地震波の位相特性の影響が強くなる恐れがあり、ダンパー履歴吸収エネルギーが最大となるダンパー減衰力容量も入力地震波の位相特性によって大きく変動する。よって、ダンパーの減衰力容量を選定する際には、入力地震動の位相特性によらずある程度以上の減衰効果を有していることが必要である。

3) 橋脚の固有周期に対して、推奨されるダンパー減衰力容量を地盤種別ごとに提案した。橋脚固有周期のうち一般的な範囲においては概ね同レベルのダンパー減衰力容量とできる。

4) ダンパー減衰力容量の選定において、橋脚の降伏震度は考慮する必要がない。

5) ダンパーの降伏変位が小さいほど橋梁の応答変位低減効果は大きい。しかし、推奨されるダンパー減衰力容量は、現実的に用いられるダンパー降伏変位 $\delta_{dy}=5\sim 30\text{mm}$ の範囲ではダンパー降伏変位によらないものとする。

6) 対象とする地震動レベルが大きくなるにつれて、選定すべきダンパー減衰力容量は大きくなる。

第 6 章では、第 3 章から第 5 章の検討結果を用いて、ブレーキダンパーを用いた制震橋梁の実務設計における設計法を示した。設計法において、通常の橋梁と異なる主要な手順は、動的解析による応答の計算を行う際に躯体諸元のほかにブレーキダンパーの減衰力を定めなければならないことと、ブレーキダンパーの照査を行う必要があることである。これを効率的に実現するための設計フローを示

すとともに、各手順の中で注意すべきことを示した。さらに、この設計法を用いて、ブレーキダンパーを用いた橋梁について試設計を行い、ブレーキダンパーを用いなかった場合との比較を行った。その結果、ブレーキダンパーを用いることで橋脚の構築コストを7%低減できると同時に、地震時の応答変位を20～80%まで低減できることがわかった。

第7章では、本研究を総括した。

以上、本論文は、橋梁用として適していると考えられるダンパーとして、ブレーキダンパーの利用に着目し、その性能を評価するとともに、実用的設計法を提案したものである。第6章における試設計の結果で示した通り、制震構造を効率的に利用することは橋梁の地震時性能の向上とコストダウンを両立させる可能性を有している。本論文は、性能及びコストの面で合理的である橋梁を設計するための新たな選択肢を与えるものであり、安全で経済的な社会インフラの構築に資するものである。

論文審査結果の要旨

本論文は、橋梁用に適しているダンパーとして、皿バネボルトセットを用いた摩擦型ダンパー（以下、ブレーキダンパーと称す）の利用を提案し、その性能を評価するとともに、設計法を提案したものである。論文は第1章から第7章で構成される。

第1章では、研究の背景として、橋梁の地震対策の現状や制震構造の概要をまとめ、制震構造の適用が進んでいない状況を示した。次に本研究の対象とするブレーキダンパーに関して、メカニズムを示し、実用化のための課題を挙げ、本研究の目的を示した。

第2章では、ダンパーの性能評価および設計法に関して既往の研究をまとめ、その問題点を論じた。

第3章では、ブレーキダンパー単体を動的に強制変形させた実験を行い、その基本的な特性を確認したうえで、地震時の減衰性能についての評価を行った。その結果から設計モデルを構築し提案した。設計モデルの構築には独創性が認められる。

第4章では、橋梁全体系の振動台実験を行ない、ブレーキダンパーの有無による応答性状の違いに関して、損傷や履歴吸収エネルギーの観点から比較し、制震橋梁の有効性を確認した。さらに、シミュレーション解析により、ダンパーのモデル化について考察を行うとともに、第3章の設計モデルの適用性について検証を行い、その妥当性を確認した。実験と解析によりこのダンパーの適用性を確認したことは、大きな成果である。

第5章では、地震応答解析をパラメトリックに行うことによって、制震橋梁の実務設計におけるダンパー減衰力容量の選定法について検討した。ダンパー減衰力容量の推奨値を提示したことは画期的である。

第6章では、第3章から第5章の検討結果を用いて、ブレーキダンパーを用いた制震橋梁の実務設計における設計法をまとめた。さらに、ブレーキダンパーを用いた橋梁について試設計を行い、ブレーキダンパーを用いることで、コスト低減と地震時性能の向上を両立できることを示した。

第7章では、本研究を総括した。

以上、本論文は、制震橋梁用に用いるダンパーとしてブレーキダンパーの利用を提案し、その性能を評価するとともに、実用的設計法を提案したものである。このように本論文は、性能及びコストの面で合理的である橋梁を設計するための新たな自由度を与えるものであり、安全で経済的な社会インフラの構築に資するものである。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。